

水平 2 方向地震動の軌跡特性が 土柱モデルの非線形応答に及ぼす影響

井上 和真¹・立石 章²・渡辺 和明³・五十嵐 晃⁴

¹正会員 大成建設株式会社原子力本部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 新宿センタービル)

E-mail:inukzm00@pub.taisei.co.jp

²正会員 大成建設株式会社技術センター (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1)

E-mail:tateishi@ce.taisei.co.jp

³正会員 大成建設株式会社原子力本部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 新宿センタービル)

E-mail:kwatanab@ce.taisei.co.jp

⁴正会員 京都大学防災研究所 教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail:igarashi.akira.7m@kyoto-u.ac.jp

本研究では、3 次元地盤地震応答解析において水平 2 方向入力 of 加速度軌跡が地盤の非線形応答に及ぼす影響を数値解析的に検討した。検討に用いた入力地震動は、著者らが考案した 2 方向応答スペクトルに適合した 4 種の加速度軌跡の水平 2 方向入力とした。地盤の非線形性を考慮した土柱モデルを対象に、周波数領域における等価線形解析と時間領域における逐次非線形解析の 2 種類の解析手法で、入力振幅を変化させた地震応答解析を行った。その結果、等価線形解析では、2 方向入力の加速度軌跡の違いが地盤の最大応答に及ぼす影響が小さいことを明らかにした。また、独立履歴モデルによる逐次非線形解析では、入力地震動を円形軌跡とした場合に、観測記録の実位相を用いた加速度軌跡などに比べて、地盤の非線形応答によるひずみが大きくなる傾向となった。

Key Words: seismic ground response analysis, bi-axial response spectrum, acceleration trajectory, spectrum-compatible accelerograms, incremental dynamic analysis

1. はじめに

近年の解析環境の発達によって、3 次元モデルを対象による地震応答解析がより一般的になりつつある。水平 2 方向入力による 3 次元地震応答解析を用いた構造物や地盤の耐震設計・耐震性能照査の環境が整いつつあるが、水平 2 次元の地震時挙動における入力と応答の關係に着目した研究は少なく、水平 2 方向入力による耐震設計・耐震性能照査体系の構築にあたっては、入力と応答の關係を整理することは重要である。このような背景から著者らは、2 方向入力と構造モデルの非線形応答の關係に着目した研究¹⁾²⁾に継続して取り組んでいる。しかし、2 方向入力と地盤の地震応答の關係に着目した研究は、ほとんど実施されていないのが現状である。

また、東北地方太平洋沖地震や熊本地震といった近年の地震被害から、想定外地震に対する地震応答評価が着目されている。例えば、モンテカルロシミュレーションを用いた確率論的地震危険度評価などが挙げられるが、

計算回数が膨大になることなどの課題がある。その一方で、設計地震動レベル以上の振幅に対する検討方法として、入力地震動の振幅を徐々に増加させながら非線形時刻歴地震応答解析を繰り返す行う漸増動的解析 (Incremental Dynamic Analysis, IDA)がある。IDA は入力波に振幅倍率 S.F(Scale Factor)を乗じることで、線形に振幅調整を行い、小さいものから順次に入力することで、振幅レベルに応じた地震応答を評価する手法である⁴⁾。例えば、谷口らは動的特性が複雑な長大橋に IDA を適用することで、構造物の損傷順序を考慮した耐震性の明確な評価方法を示している⁵⁾。谷口らの研究のように、IDA は大地震に対する耐震性能評価として、簡便かつ有効な手段であるといえる。一方、地盤地震応答や地中構造を対象にした想定外地震や構造物の破壊順序に関する検討は少ない。例えば、高橋らは、地盤と LNG 地下タンクを対象にした 3 次元非線形 FEM モデルを用いて、最終破壊検討を行なった⁶⁾。しかし、いわゆるプッシュオーバー解析であり、静的な水平震度を漸増することで

地震力を与えているため、構造物-地盤系のもつ動的挙動は考慮されていない。

このような背景から、本研究では、構造モデルを対象にした既往の2方向入力への検討や漸増動的解析の概念を参考とし、土柱モデルを対象に検討を行なった。様々な振幅レベルの加速度軌跡の異なる2方向応答スペクトル適合波を入力とし、等価線形手法と逐次非線形手法による地盤地震応答解析を行い、水平2方向入力の加速度軌跡が地盤モデルの非線形応答に及ぼす影響について数値解析によって検討した。

2. 加速軌跡の異なる2方向応答スペクトル適合波

(1) 2方向応答スペクトル

時間を t 、水平面を x - y 座標系で定義した場合に、与えられた2方向入力に対する固有周期 T を変数にした等方な2次元線形弾性1質点振動子（図-1）の水平2次元応答値の x 方向成分、 y 方向成分を $a_x(T, t)$ 、 $a_y(T, t)$ とする。水平2次元応答の動径方向の最大値 $S_{ra}(T)$ と、固有周期 T の関係を2方向応答スペクトルと呼び、この定義を式(1)に示す。1995年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台における観測記録(以下、JMA神戸波)の加速度軌跡を図-2に示す。また、JMA神戸波を例に、減衰比 h を0.05とした場合の2方向加速度応答スペクトルとNS成分、EW成分の加速度応答スペクトルを図-3に示す。なお、図-2の破線は、加速度軌跡の主軸方向⁷⁾であり、主軸方向は加速度軌跡を構成する離散データの分散が最大となる方向としている。図-2の加速度軌跡と主軸方向から、主軸方向は北北西-南南東の方向を示しておりNS方向と近いことがわかる。図-3から、固有周期0.7秒以下の領域では、2方向応答スペクトルとNS方向の応答スペクトルの大きさが近いことがわかる。

$$S_{ra}(T) = \max_t \sqrt{a_x(T, t)^2 + a_y(T, t)^2} \quad (1)$$

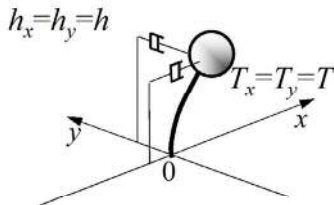


図-1 2次元線形弾性1質点振動子

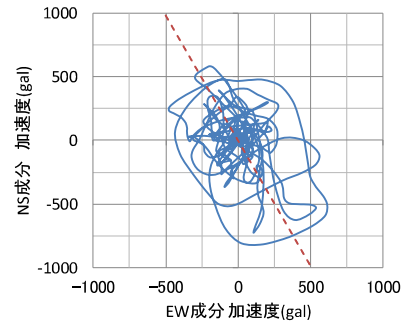


図-2 JMA神戸波の加速度軌跡と主軸方向

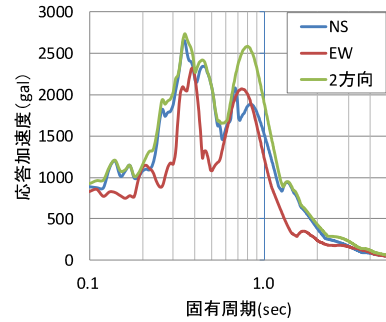


図-3 JMA神戸波の2方向応答スペクトル

(2) 2方向加速度応答スペクトル適合波の作成法

2方向応答スペクトルに適合した2方向入力地震動の作成法として、耐震性能照査用の応答スペクトルに適合した標準波とその標準波のヒルベルト変換により求まる相補直交成分波の組合せを用いる手法が提案されている⁸⁾。また、相補直交成分波に楕円偏極指標を導入し、相補直交成分波の振幅を調整した水平2方向入力の作成法も検討されている⁹⁾。これらの2方向入力地震動の作成法は、水平直交2成分のうちの1成分を耐震性能照査に定義されたスペクトル適合波、すなわち標準波とし、その直交方向は標準波にヒルベルト変換を適用した加速度波形とするというものである。ヒルベルト変換は、原波の位相を 90° シフトさせるものであり、原波（標準波）とヒルベルト変換波（相補直交成分波）の水平直交2成分間の加速度波形の位相差は全ての周波数で 90° となる。そのため、それらの2方向入力の加速度軌跡は円形あるいは楕円形状となる。また、相補直交成分波は、標準波から周波数領域における振幅を調整していないため、それぞれ1方向の応答スペクトルは、ほぼ同一の形状となる。さらに、標準波と相補直交成分波の2方向入力による2方向応答スペクトルも、それぞれの1方向入力の応答スペクトルとほぼ同一の形状となる。標準波と相補直交成分波の2方向入力の2方向応答スペクトルは、耐震性能照査用の応答スペクトルに適合しているという観点で見れば、入力地震動の大きさ・強度という意味で

担保されている。しかし、標準波と相補直交成分波の 2 方向入力、構造物の耐震性能照査においては 1 方向入力時に比べて、保守的になる可能性があることや、加速度軌跡は円形となることから実際の地震動が持つ複雑な軌跡特性を有していないなどの課題がある⁸⁾。

このような背景を踏まえて、著者らは、観測記録の水平 2 成分の位相特性を用いて、2 方向応答スペクトルへの適合手法を考案した³⁾。この手法では、従来の 1 方向尾の振幅調整による目標応答スペクトルへの適合を、2 方向に拡張したものであり、1 方向での手法と同様に位相は調整しない。また、目標となる応答スペクトルは 2 方向応答スペクトルとし、それぞれの 1 方向の応答スペクトルの大きさには制約を設けていない。

図-4 に本計算例の原波である JMA 神戸波の観測波の加速度軌跡と 2 方向スペクトル適合後の加速度軌跡を示す。両者を比較すると、主軸方向の加速度が小さくなったことが確認できる。また、スペクトル適合前後の JMA 神戸波の 2 方向応答スペクトルと目標応答スペクトルの関係を図-5 に示す。図-5 に示すように、2 方向応答スペクトルの形状が観測波から変化し、最終的には目標応答スペクトルに対して良好な適合がなされていることが確認できる。

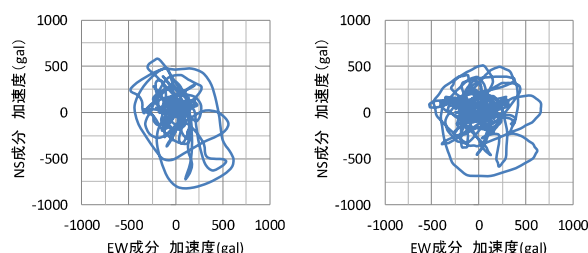


図-4 JMA 神戸波の 2 方向応答スペクトル適合前後での加速度軌跡の比較（左：適合前，右：適合後）

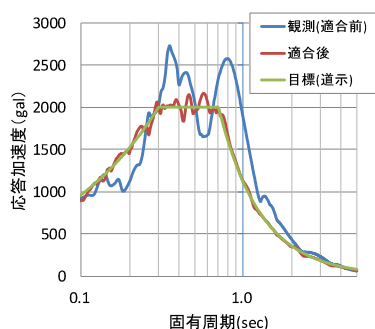


図-5 JMA 神戸波の 2 方向応答スペクトルの適合前後の比較

(3) 加速度軌跡の異なる 2 方向応答スペクトル適合波

道路橋示方書¹⁰⁾に示されるレベル 2 地震のタイプ II の I 種地盤の兵庫県南部地震神戸海洋気象台地盤上観測波 NS 成分の振幅調整波（以下、II-I-1 波）とその応答スペクトルを基本とし、同一の 2 方向応答スペクトルに適合する 4 ケースの入力地震動を表-1 に示す。この 4 ケースの地震動を 4 章の検討で用いる 2 方向入力の基本とする。図-6 から図-9 に各ケースの加速度軌跡を、図-10 に各ケースの 2 方向加速度応答スペクトルを重ね書きした図を示す。図-10 に示されるように、各ケースの 2 方向加速度応答スペクトルはほぼ等しいことがわかる。

表-1 入力地震動のケース一覧

ケース	入力の加速度軌跡	成分	地震動	基本振幅倍率
Case 1	直線	x	II-I-1波	$1/\sqrt{2}$
		y	II-I-1波	$1/\sqrt{2}$
Case 2	円形 ⁸⁾	x	II-I-1波	1.0
		y	II-I-1波の相補直交成分波（ヒルベルト変換波）	1.0
Case 3	楕円形 ⁹⁾	x	II-I-1波	1.0
		y	II-I-1波の相補直交成分波（ヒルベルト変換波）	0.3
Case 4	実位相 ³⁾	x	JMA神戸観測波のEW成分の振幅調整波	1.0
		y	JMA神戸観測波のNS成分の振幅調整波	1.0

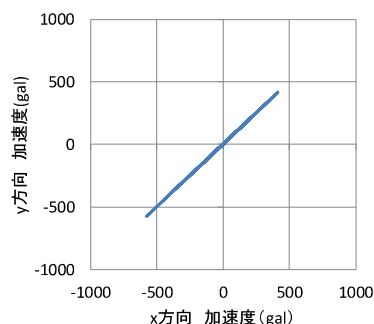


図-6 Case 1（直線軌跡）の加速度軌跡

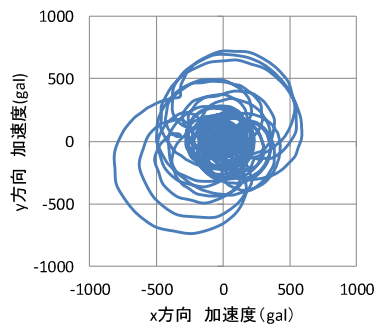


図-7 Case 2（円形軌跡）の加速度軌跡

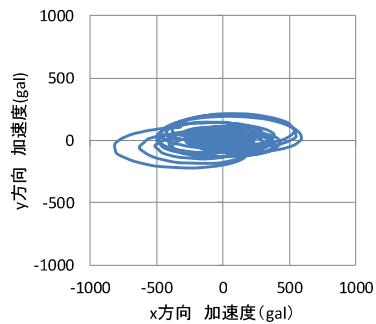


図-8 Case 3（楕円形軌跡）の加速度軌跡

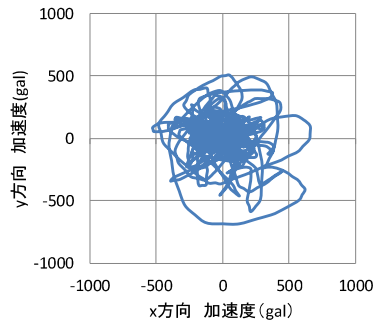


図-9 Case 4（実位相）の加速度軌跡

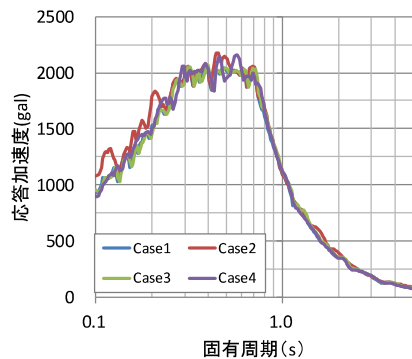


図-10 各ケースの2方向加速度応答スペクトル

3. 解析条件

(1) 解析モデル

ある発電所の取放水系構造物の設置地盤を参考に、水平2方向のみに自由度を持つ、土柱モデルを設定した2次元土柱モデルは、埋戻土と2層の岩盤層からなる深さ50mのモデルとした。図-11に土柱モデルの概念図を、表-2に地盤物性の一覧表を示す。埋戻土のせん断弾性係数には拘束圧依存特性、非線形特性にはひずみ依存特性を考慮した。モデル底面からの水平2方向入力による動的な地震応答解析を行う。境界条件として、モデル底面は粘性境界とし、モデル側面は同じ平面上（同一の高さ）の節点は、MPC拘束を行い、x方向、y方向のそれぞれで同一の応答をする。この拘束条件により、2次元土柱モデルに生じる応力（ひずみ）は、 τ_x 、 τ_y (γ_x 、 γ_y)のみとなる。

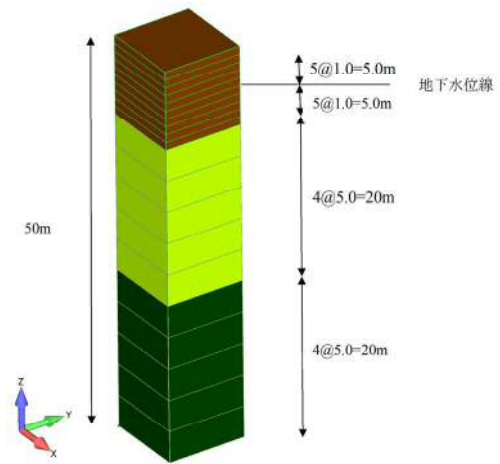


図-11 土柱モデルの構成

表-2 地盤物性物性一覧表

層番号	地層区分	層厚 (m)	密度 (g/cm ³)	初期せん断 波速度 (m/s)	初期せん断 弾性係数 (kN/m ²)	動的 ポアソン比	ひずみ 依存特性
1	埋戻土1 (地下水 以浅)	5.0	1.85	143	37594	0.38	考慮
2				188	65115		
3				213	84063		
4				232	99464		
5				247	112782		
6	埋戻土2 (地下水 以深)	5.0	1.85	250	115625	0.49	考慮
7				256	121111		
8				261	126359		
9				267	131397		
10				271	136250		
11	岩盤1	20.0	2.00	500	500000	0.41	-
12							
13							
14							
15							
16	岩盤2	20.0	2.00	800	1280000	0.41	-
17							
18							
19							
20							
底面粘性境界		—	2.00	800	1280000	0.41	-

(2) 解析手法と埋戻土の非線形モデル

土柱モデルに対する地震応答解析プログラムは、周波数領域における等価線形解析を行う FDIPIII¹¹⁾と、時間領域における逐次非線形解析を行う TDIPIII¹²⁾を用いた。

非線形性を考慮する埋戻土の剛性低下曲線 ($G/G_0-\gamma$ 関係) と減衰曲線 ($h-\gamma$) は、参考文献¹³⁾を参考に設定した。図-12 に設定した埋戻土のひずみ依存特性を示す。

等価線形解析の FDIPIII では、設定した $G/G_0-\gamma$ 曲線と $h-\gamma$ 曲線を離散的にプログラムへ入力できるため、ひずみ依存特性を直接扱うことができる。また、ひずみ依存特性である剛性低下 G/G_0 と減衰 h を算出する際の有効せん断ひずみ γ_{eff} は、式(2)のように、2 方向合成のせん断ひずみに基づいて算出する。

$$\gamma_{eff} = \alpha \cdot \max_t \sqrt{\gamma_{xx}(t)^2 + \gamma_{yy}(t)^2} \quad (2)$$

ここに、

γ_{eff} : 有効せん断ひずみ

α : 有効ひずみ換算係数(=0.65)

$\gamma_x(t)$, $\gamma_y(t)$: せん断ひずみ

逐次非線形解析の TDIPIII では、ひずみ依存曲線を応力-ひずみ関係を表す構成モデルに近似する必要がある。多次元解析に対応する地盤の構成モデルとして、吉田モデル¹⁴⁾、shawky モデル¹⁵⁾、東畑による多重せん断ばねモデル¹⁶⁾、独立履歴型モデル¹⁷⁾などがある。本研究では、与えられたひずみ依存曲線を満足するように調整した 3 次元独立履歴型の H-D モデルを用いた。地盤の構成則として骨格曲線に Masing 則を適用し、その描く軌跡を履歴曲線とする場合もあるが、目標とする $h-\gamma$ 曲線への適合性を判断し、履歴減衰による等価減衰定数を $h-\gamma$ 曲線に満足させる仮想骨格曲線を適用した。

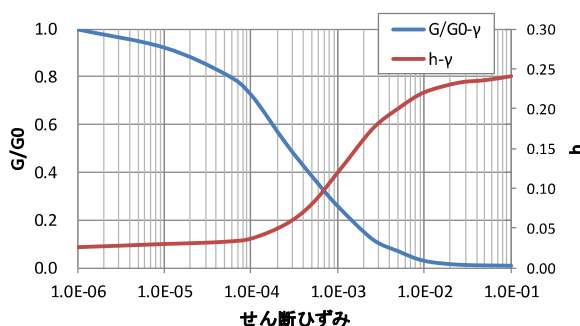


図-12 埋戻土のひずみ依存曲線

(3) 2 方向入力の場合と漸増動的解析 (IDA)

本検討においては、大別して 2 つの観点で、2 方向入力の場合を決定する。1 つ目は、2. (3) の加速度軌跡が異なる 4 ケースの 2 方向スペクトル適合波を 0.25 倍にした振幅を入力し、加速度軌跡の違いが地盤地震応答に及ぼす影響を確認する。なお、振幅倍率の 0.25 倍は、埋戻土の最大せん断ひずみが 0.1% 程度になることを理由に決定した。2 つ目は、2 方向スペクトル適合波の振幅を、0.1→0.2→0.3→0.4 倍と変化させて入力することで漸増動的解析を行い、振幅の違いが地盤地震応答に及ぼす影響を確認する。

4. 解析結果

(1) 加速度軌跡の違いに着目したケース

埋戻土を線形とした場合、周波数領域および時間領域における地震応答解析結果として、最大せん断ひずみ分布をそれぞれ図-13、14 に示す。各ケースの 2 方向入力が入力された 2 方向応答スペクトルに適合しているため、埋戻土を線形モデルとした場合の最大せん断ひずみ分布は、加速度軌跡の違いによらず、ほぼ同一の最大値分布となっているが、円形軌跡 (Case2) の場合においては若干応答が大きくなっている。これは、図-10 の 2 方向加速度応答スペクトルにおいて、土柱モデルの弾性固有周期に対応する 0.1~0.2 秒の周期帯で、円形軌跡の 2 方向加速度応答スペクトルが若干大きいことが原因であると考えられる。

続いて、埋戻土を非線形 (等価線形、逐次非線形) とした場合の、周波数領域および時間領域における地震応答解析結果として最大せん断ひずみ分布をそれぞれ、図-15、16 に示す。周波数領域における等価線形解析の場合、地盤の塑性化に伴う剛性低下は考慮されるものの、繰り返し計算における各ステップの地震応答解析は線形計算によって行われる。式(2)で定義される等価線形解析における有効せん断ひずみ γ_{eff} は、式(1)の 2 方向応答スペクトル適合波と同様に、2 方向入力に対する弾性の系の最大応答値を算出したものであり、加速度軌跡の違いが、最大応答の差に生じない。そのため、等価線形解析においては、加速度軌跡が異なる影響を地盤の地震応答に考慮することができない。一方の時間領域の逐次非線形解析の場合は、加速度軌跡の違いが、地盤の最大応答に生じている。これは、埋戻土の非線形モデルとして、独立履歴型モデルを採用しているため、x、y 方向それぞれの振幅の大きさが大きいほど、せん断剛性の低下に伴う地震応答の増大が著しくなる。

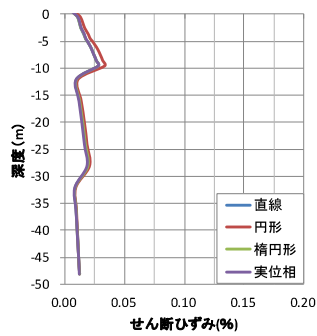


図-13 線形解析での最大せん断ひずみ分布図(周波数領域)

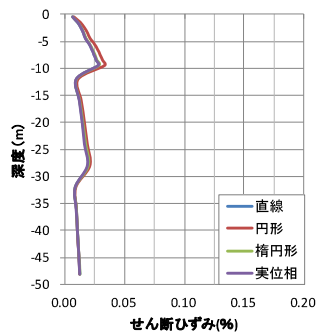


図-14 線形解析での最大せん断ひずみ分布図(時間領域)

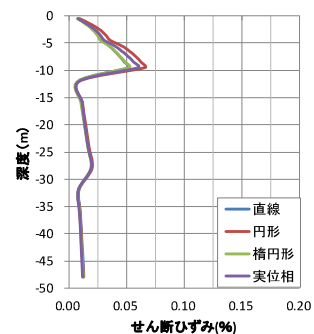


図-15 等価線形解析での最大せん断ひずみ分布図

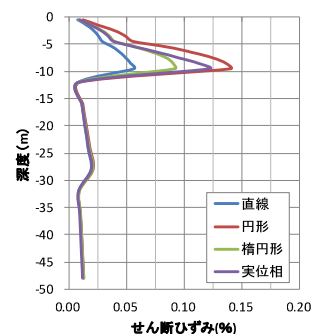


図-16 逐次非線形解析での最大せん断ひずみ分布図

(2) 漸増動的解析結果

周波数領域における等価線形解析による漸増動的解析結果として、図-17～図-20 に振幅倍率(S.F=0.1)で正規化した最大せん断ひずみの増加倍率を示す。また、S.F=0.4 とした場合の地表面応答加速度軌跡を図-21～図-24 に、地表面応答加速度による 2 方向加速度応答スペクトルを図-25 に示す。図-17～図-20 を比較すると、等価線形解析では加速度軌跡の違いによらず、最大せん断ひずみの増加倍率に大きな差が無い。また、地表面応答加速度軌跡は土柱モデル底面からの入力加速度と形状が大きく変化していないことが確認できる。更に、地表面応答加速度の 2 方向加速度応答スペクトルは、加速度軌跡の違いによって有意な違いが見られないことが確認できる。

同様に、時間領域における逐次非線形解析による漸増動的解析結果として、図-26～図-29 に振幅倍率(S.F=0.1)で正規化した最大せん断ひずみの増加倍率を示す。また、S.F=0.4 とした場合の地表面応答加速度軌跡を図-30～図-33 に、地表面応答加速度による 2 方向加速度応答スペクトルを図-34 に示す。等価線形解析と異なり、最大せん断ひずみの増加倍率は、加速度軌跡によって有意な差があり、S.F.が大きいほど、その差は顕著である。また、地表面加速度に着目すると、入力加速度の形状が大きく変化し、円形軌跡、楕円形軌跡、実位相軌跡ともに、矩形のような加速度軌跡となっていることがわかる。これは、x 方向と y 方向の地震応答計算に相互作用を持たない独立履歴モデルを採用していることが原因であり、この場合の降伏曲面は矩形となり、客観性の原理を満たしていないことが確認できる¹⁶⁾。地震応答地表面応答加速度の 2 方向加速度応答スペクトルも、加速度軌跡の違いによって、大きさや卓越周期が異なることがわかる。

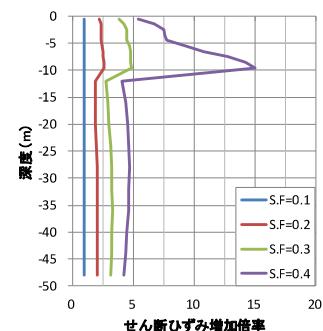


図-17 最大せん断ひずみの増加倍率(等価線形, 直線軌跡)

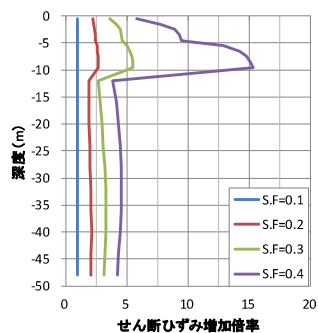


図-18 最大せん断ひずみの増加倍率(等価線形, 円形軌跡)

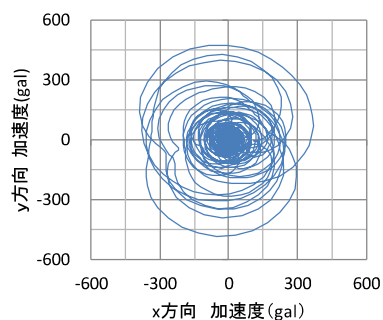


図-22 地表面加速度軌跡(等価線形, 円形軌跡, S.F=0.4)

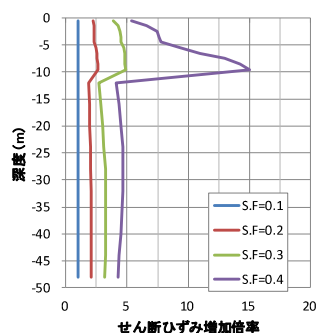


図-19 最大せん断ひずみの増加倍率(等価線形, 楕円形軌跡)

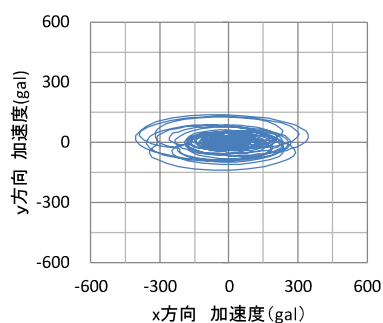


図-23 地表面加速度軌跡(等価線形, 楕円形軌跡, S.F=0.4)

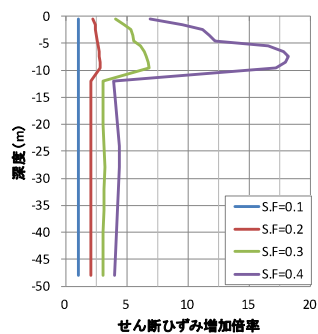


図-20 最大せん断ひずみの増加倍率(等価線形, 実位相軌跡)

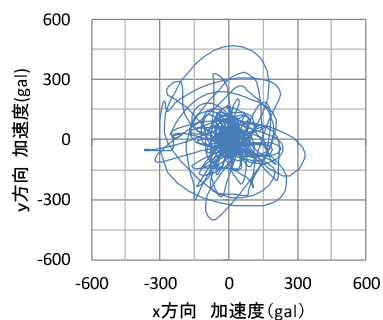


図-24 地表面加速度軌跡(等価線形, 実位相軌跡, S.F=0.4)

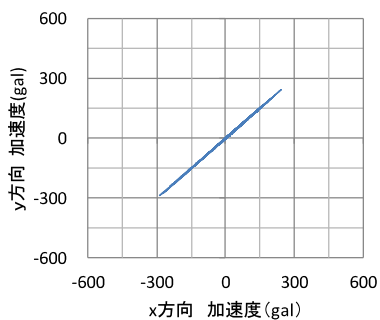


図-21 地表面加速度軌跡(等価線形, 直線軌跡, S.F=0.4)

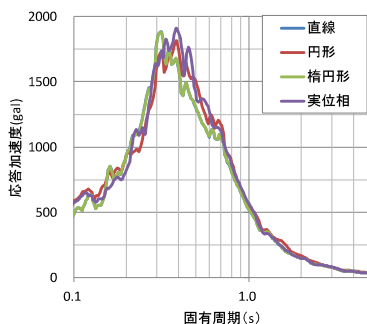


図-25 地表面加速度の2方向加速度応答スペクトル(等価線形, S.F=0.4)

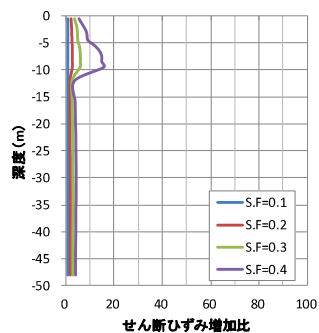


図-26 最大せん断ひずみの増加倍率(逐次非線形, 直線軌跡)

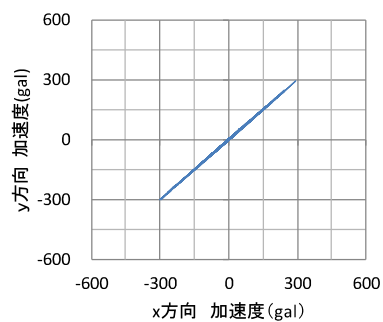


図-30 地表面加速度軌跡(逐次非線形, 直線軌跡, S.F=0.4)

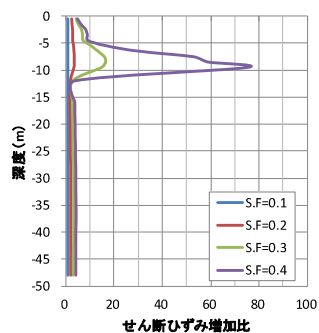


図-27 最大せん断ひずみの増加倍率(逐次非線形, 円形軌跡)

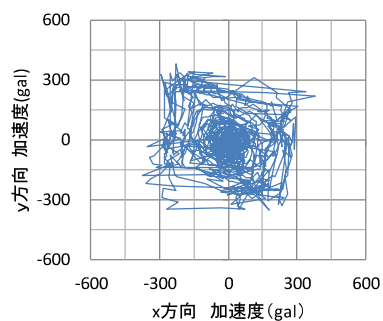


図-31 地表面加速度軌跡(逐次非線形, 円形軌跡, S.F=0.4)

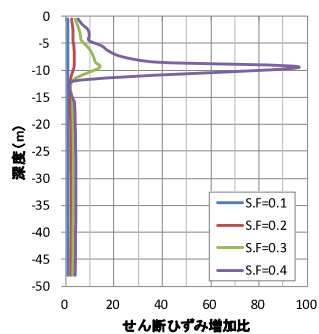


図-28 最大せん断ひずみの増加倍率(逐次非線形, 楕円形軌跡)

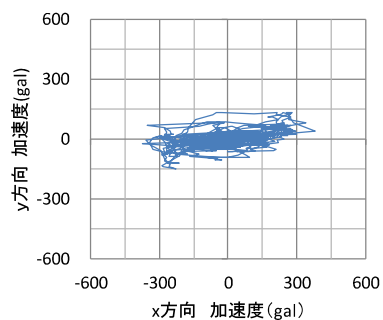


図-32 地表面加速度軌跡(逐次非線形, 楕円形軌跡, S.F=0.4)

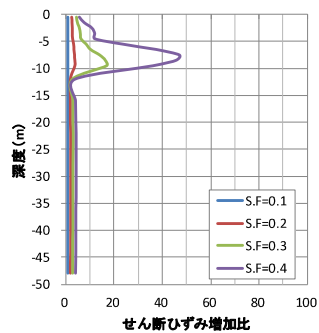


図-29 最大せん断ひずみの増加倍率(逐次非線形, 実位相軌跡)

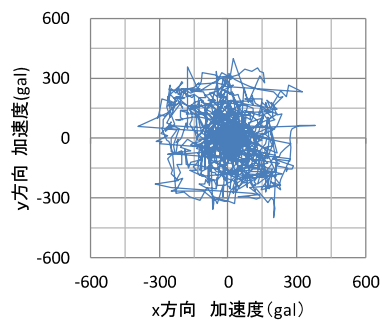


図-33 地表面加速度軌跡(逐次非線形, 実位相軌跡, S.F=0.4)

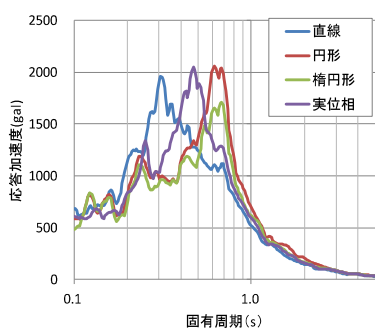


図-34 地表面加速度の2方向加速度応答スペクトル
(逐次非線形, SF=0.4)

6. 結論と今後の課題

本研究は、水平2方向入力による3次元地盤地震応答解析の傾向を整理するために、水平2方向入力の加速度軌跡が地盤の非線形応答に及ぼす影響を検討した。実地盤を参考に地層構成、地盤物性値を設定し、地盤の非線形性を考慮した土柱モデルを対象に、周波数領域における等価線解析と時間領域における逐次非線形解析によって、入力振幅を変化させて地盤地震応答解析を行った。本研究を通じて得られた知見は以下の通りである。

- 1) 4種の加速度軌跡の異なる同一の2方向スペクトル適合波を入力とした結果、等価線形解析では加速度軌跡の違いを地盤地震応答解析によって考慮できないことがわかった。一方の3次元独立履歴モデルを用いた逐次非線形解析では、円形軌跡の入力による地盤の地震応答が大きくなった。
- 2) IDAによると、等価線形解析では加速度軌跡の違いによらず、最大せん断ひずみの増加倍率は大きな差が無い。また、地表面応答加速度軌跡は土柱モデル底面からの入力加速度と形状が大きく変化していないことが確認できる。逐次非線形解析では、最大せん断ひずみの増加倍率は、加速度軌跡によって有意な差があり、振幅倍率が大きいほど、その差は顕著である。また、地表面加速度に着目すると、入力加速度の形状が大きく変化し、円形軌跡、楕円形軌跡、実位相軌跡ともに、矩形のような加速度軌跡となる。地表面応答加速度の2方向加速度応答スペクトルは、加速度軌跡の違いによって、大きさや周期特性が異なる結果となった。

また、今後の課題を以下に示す。

- 1) 地盤地震応答解析における解析手法や構成モデルの妥当性、再現性を目的に、鉛直アレーによる強震

動の観測記録を、2方向入力によって再現性を確認する必要がある。

- 2) 本検討で用いた対象モデルは、土柱モデルであり、単純せん断変形しか考慮されていない。地盤地震応答として、軸差せん断を考慮した検討も行う必要があると考えられる。

謝辞：本研究に 1995 年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台の観測波使用させていただきました。ここに感謝の意を記す。

参考文献

- 1) 井上和真, 五十嵐晃, 渡辺和明: 2方向非線形応答スペクトルを用いた水平2方向地震動の評価, 土木学会 第20回応用力学シンポジウム講演概要集, pp.255-256, 2017
- 2) 井上和真, 渡辺和明, 五十嵐晃: 2方向非線形応答スペクトルによる加速度軌跡の異なる2方向応答スペクトル適合波の評価, 土木学会 第20回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.77-83, 2017
- 3) 井上和真, 渡辺和明, 五十嵐晃: 水平2方向地震動の軌跡特性が構造物の2方向弾塑性応答に及ぼす影響, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), 73(4), pp. I_122-I_134, 2017.9.
- 4) FEMA: Recommended seismic design criteria for new steel moment frame buildings, Report No.FEMA-350,SAC Joint Venture, Federal Emergency Management Agency, Washington DC,2000
- 5) 谷口惺, 五十嵐晃, 木田秀人: 漸増動的解析(IDA)に基づく長大橋の耐震性能評価土木学会論文集A1 (構造・地震工学) Vol.70, No.4, I_323-I333, 2014
- 6) 高橋智彦, 山邊洋之, 山本平, 山梨達哉: 地盤～タンク連成3次元RC非線形モデルを用いたLNG地下タンクの耐震設計その (3) ～最終破壊形態の評価～, 土木学会第71回年次学術講演会講演概要集 (I-489), 2016
- 7) 日本建築学会: 多次元入力地震動と構造物の応答, 丸善出版, 1998.
- 8) 五十嵐晃, 井上和真, 古川愛子, 宇野裕恵, 松田宏: 標準波-相補直交成分波の組合せによる橋梁の耐震照査用水平2方向入力地震動, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol. 68, pp. I_458-I_469, 2012.
- 9) 五十嵐晃, 儀久昂: 楕円偏極指標を規定したスペクトル適合水平2方向地震動の作成, 土木学会構造工学論文集 vol.62A, pp273-279, 2016.
- 10) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, 丸善, 2012.
- 11) アーク情報システム: FDIPIIIマニュアル バージョン3.08, 2016
- 12) アーク情報システム: TDIPIIIマニュアル バージョン3.08, 2016

- 13) 沿岸開発技術研究センター：埋立地の液状化対策ハンドブック（改訂版），1997年
- 14) 吉田望：地盤の地震応答解析，鹿島出版会，2010
- 15) A.SHAWKY, K.MAEKAWA：Nonlinear Response of Under-ground RC Structures Under Shear., 土木学会論文集 1996(538), 195-206, 1996
- 16) Towhata,I. and Ishihara,K. : Modeling Soil Behavior Under Principal Stress Axes Rotation, Proc. of 5th International Conf. on Num. Methods in Geomechanics,Nagoya, Vol.1, pp.523-530,1985
- 17) 福武毅芳：土の多方向繰返しせん断特性を考慮した地盤・構造物の三次元液状化解析に関する研究，名古屋工業大学博士論文，1997

EFFECT OF PARTICLE ORBIT CHARACTERISTICS ON NONLINEAR SEISMIC RESPONSE OF SOIL COLUMN MODELS

Kazuma INOUE, Akira TATEISHI, Kazuaki WATANABE and Akira IGARASHI

In this study, we investigated the effect of trajectories of bi-directional accelerograms on nonlinear seismic response of 2D soil column. Seismic response analysis for 2D soil column model were conducted at frequency domain and time domain, as input four kinds of bi-directional accelerograms matching the same elastic response spectrum.

As a result, in frequency domain, the maximum response of soil column is almost the same value, irrespective of the difference in acceleration trajectory. On the other hand, in time domain, the maximum seismic response values of soil column are different for each acceleration trajectories. In particular, in case of circular trajectory, seismic nonlinear response tends to increase.